

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

Volume 5, Number 309 (2016), 64 – 72

UDC 523.62

**B.I. Demchenko, L.I. Shestakova**

Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty, Kazakhstan  
[shest1952@mail.ru](mailto:shest1952@mail.ru)

## ORBITAL EVOLUTION OF OLIVINE DUST GRAIN DURING SUBLIMATION PROCESS NEAR THE SUN

**Abstract.** The results of modeling of orbital evolution of dust particles in the near-solar region for synthetic olivine particles ( $MgFeSiO_4$ ) during the evaporation process are presented. Calculations of the temperature of the dust particles are made for a set of radii from 0.1 to 10 microns, and at different distances from the Sun. Calculations are based on the solution of the heat balance equation, "absorption = radiation", taking into account losses to evaporation. Optical properties are calculated from Mie theory for homogeneous spherical particles in accordance with the refractive index of synthetic olivine.

We have considered the effect of the pressure of radiation, solar wind and the braking effects of the Poynting-Robertson on the dynamics of dust particles. It was found that the active area of sublimation begins at a distance of 30 solar radii. According to our calculations, the particles with radius in the range of 0.04 to 0.6 microns are leaving the solar system under the action of light pressure after the separation from the parent body, if at the time of separation will not appear in the zone sublimation. Smaller particles closer together with the Sun and evaporate. Larger particles drift to the sublimation zone, where they overlook the high elliptic orbits and then completely evaporated.

A surprising aspect was the behavior of large particles torn away from their parent bodies within the area of sublimation. After reaching the highly elliptical orbits, they can leave the solar system, after sublimation till characteristic radius of 0.4  $\mu m$ .

**Keywords:** Solar system, circumsolar dust, orbital evolution, dust sublimation.

УДК 523.62

**Б.И. Демченко, Л.И. Шестакова**

Астрофизический институт им. В.Г.Фесенкова, Алматы, Казахстан

## ОРБИТАЛЬНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ ОЛИВИНА В ПРОЦЕССЕ СУБЛИМАЦИИ ОКОЛО СОЛНЦА

**Аннотация.** Представлены результаты моделирования орбитальной эволюции пылевых частиц в околосолнечной области для синтетических частиц оливина ( $MgFeSiO_4$ ) в процессе испарения. Расчеты температуры пылевых частиц выполнены для набора радиусов от 0.1 до 10  $\mu m$  и различных расстояний от Солнца. Расчеты основаны на решении уравнения теплового баланса «поглощение-излучение» с учетом потерь на испарение. Оптические свойства рассчитаны по теории Ми для однородных сферических частиц в соответствии с индексами рефракции синтетического оливина.

Мы рассмотрели влияние давления радиации, солнечного ветра и эффектов торможения Пойнтинга-Робертсона на динамику пылевых частиц. Было установлено, что область активной сублимации начинается на расстоянии 30 солнечных радиусов. Согласно нашим расчетам, частицы радиусами в интервале от 0.04 до 0.6  $\mu m$  покидают Солнечную систему под действием светового давления после отрыва от родительского

тела, если в момент отрыва не окажутся в зоне сублимации. Более мелкие частицы сближаются с Солнцем и испаряются. Более крупные частицы дрейфуют к зоне сублимации, где они выходят на высокоэллиптические орбиты и затем полностью испаряются.

Неожиданным оказалось поведение крупных частиц, оторвавшихся от родительских тел внутри зоны сублимации. После выхода на высокоэллиптические орбиты они могут покинуть Солнечную систему, испарившись до характерного радиуса 0.4 мкм.

**Ключевые слова:** Солнечная система, околосолнечная пыль, орбитальная эволюция, сублимация пыли.

**Введение.** Область сублимации пыли около Солнца практически недоступна для наблюдений из-за близости яркого солнечного диска. Наземные наблюдения этой области, так называемой пылевой или F-короны, крайне редки, поскольку они становятся возможными только во время полных солнечных затмений, когда фон неба значительно ослаблен. В то же время эта область интересна тем, что там происходят многие процессы, связанные с взаимодействием и обменом веществом между солнечной короной и окружающим зодиакальным пылевым облаком.

С помощью недавних космических экспериментов COBE/DIRBE в инфракрасном диапазоне спектра была исследована структура межпланетного пылевого облака и получена его модель [1,2]. Эти наблюдения были ориентированы на исследования слабого фона неба на больших расстояниях от Солнца. При этом околосолнечная область по-прежнему остается за пределами экспериментальных исследований.

Тем не менее, теоретические исследования возможного поведения пылевых частиц различного химического состава вполне доступны. С появлением новых данных об индексах рефракции различных материалов в большом интервале длин волн появилась возможность рассчитать по теории Ми эмиссионные спектры этих материалов для различных температур ( $T$ ) и размеров частиц ( $s$ ). Были рассчитаны распределения температуры пылевых частиц с использованием реального спектра Солнца [3], проведены первые численные расчеты орбит частиц в области сублимации [4-7], а также рассчитаны температуры и световое давление в зависимости от размеров частиц и их расстояний для некоторых звезд [8]. Все подобные работы указывают на наличие области, где медленное заspirализование круговых орбит частиц по направлению к Солнцу под действием торможений (дрейф по закону Пойнтинга-Робертсона) прекращается и, с началом активного испарения, частицы выходят на высокоэллиптические орбиты прежде, чем полностью испаряться, либо происходит вылет частиц за пределы Солнечной системы. Наблюдения лучевых скоростей пыли в F-короне [9] показали, что граница беспылевой зоны, где пыль полностью испаряется, находится в пределах расстояний (7-11) солнечных радиусов. Эти результаты позволяют с помощью теоретических расчетов орбитальной эволюции частиц выделить группу материалов, которые ближе всего соответствуют результатам наблюдений.

В данной работе для расчетов орбитальной эволюции пылевых частиц нами выбран силикатный материал – оливин, который считается основным компонентом минералогического состава околосолнечной пыли. Мы выбрали смешанный состав из магнезиальных и железосодержащих оливинов в равной пропорции, который можно описать синтетической формулой  $MgFeSiO_4$ . Используются данные комплексных индексов рефракции согласно [10].

Расчеты орбитальной эволюции проведены с учетом испарения пылевых частиц. Темп сублимации (испарения) зависит от температуры нагрева пылевых частиц (гранул) в космическом пространстве в зависимости от радиусов пылинок, материала, из которого они состоят, и расстояния до Солнца. Все практически важные параметры, характеризующие взаимодействие сферических пылевых частиц с излучением, рассчитываются по теории Ми [11,12]. Учитывалось влияние радиационного давления на пылевые частицы, давление солнечного ветра, а также эффектов торможения Пойнтинга-Робертсона на динамику пыли. Предполагается, что пылевые

гранулы нагреты изотермично, сублимируют изотропно, реактивная сила отсутствует, пылинки имеют форму шара и однородны по составу. Проанализирован диапазон радиусов частиц синтетического оливина (s) от 0.01мкм до 100мкм.

**Исходные данные.** Использованы таблицы по распределению энергии в солнечном спектре для интервала длин волн  $\lambda$  от  $\lambda_1 = 0.0075$  мкм до  $\lambda_2 = 50$  мкм, согласно [13], которые переведены в единую систему единиц дж/(сек·м<sup>2</sup>·мкм·ср). В этих же пределах взяты таблицы комплексных индексов рефракции выбранных материалов:  $m(\lambda) = n(\lambda) + ik(\lambda)$ , с добавлением экстраполированных величин со стороны ультрафиолета [14,15].

Параметры  $n$ ,  $k$  - это входные параметры теории Ми, они зависят от длины волны  $\lambda$  и типа вещества. Из теории Ми мы находим практически важные параметры, характеризующие взаимодействие пылевых частиц с излучением: эффективные факторы поглощения -  $Q_{abs}$  и светового давления -  $Q_{pres}$ , которые определяются для всего диапазона размеров частиц от 0.01мкм до 100мкм.

Типичные параметры солнечного ветра взяты по двухжидкостной модели, полученной по результатам многолетних наблюдений [16] в интервале расстояний от 2 до 270 солнечных радиусов с учетом радиальной и тангенциальной составляющих скорости солнечного ветра. Область коротации солнечного ветра находится внутри 10 солнечных радиусов. Все расчетные программы написаны на языке 'C' в среде TURBO-C++, отлаживались под управлением операционной системы WINDOWS-XP.

Таблица1 – Параметры материалов

material	$\delta$ , г/см <sup>3</sup>	$\mu$	H, эрг/г	$P_m$ , дин/см <sup>2</sup>
olivine	3.3	169.1	3.21e10	6.72e14
pyroxene	3.3	60.1	9.60e10	3.12e11
obsidian	2.37	67.0	7.12e10	1.07e14

Вещественные параметры оливина взяты из таблицы 1, согласно [17], где  $\delta$  - плотность вещества в г/см<sup>3</sup>,  $\mu$  - молекулярный вес, H - удельная энергия испарения,  $P_m$  - давление насыщенных паров для предельно больших температур T.

**Уравнение испарения частицы и расчеты теплового баланса.** Скорость уменьшения радиуса частицы или темп испарения ds/dt в см/сек выражается согласно [4,5] в преобразованном нами виде:

$$ds/dt = -C_1/\delta \cdot P \cdot (\mu/T)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $\lg(P) = C_2 - C_3/T$ ,  $\delta$  - плотность в-ва, P - давление насыщенных паров в торах (1тор=1мм.рт.ст., 1тор=133.322па  $\approx$  133па = 133н/м<sup>2</sup> = 1330дин/см<sup>2</sup>),  $\mu$  - молекулярный вес, T - температура в К.

Константы, введенные в уравнение темпа испарения:

$$C_1 = 133/2 \cdot [m_H/(3k)]^{1/2} = 0.421062 \text{ [кг/(м·сек)·К}^{1/2}\text{]},$$

$$C_2 = 0.4342945 \cdot H_L/(kT_0) = C_3/T_0,$$

$$C_3 = 0.4342945 \cdot H_L/k = C_2 \cdot T_0,$$

где  $T_0$  - температура, при которой давление равно 133па = 1тор,  $H_L = H \cdot \mu_H$  - энергия испарения одной молекулы, H - удельная (латентная) теплота парообразования,  $\mu_H$  - масса молекулы, k - постоянная Больцмана.

Величина  $C_1$  не зависит от свойств вещества, то есть это универсальная константа,  $C_3$  зависит только от  $H_L$ ,  $C_2$  и  $C_3$  - зависит от  $H_L$  и от  $T_0$ .

Уравнение теплового баланса частицы с учетом испарения имеет следующий вид:

$$E_{abs} = E_{rad} + E_{subl} \quad (2)$$

$$\text{где: } E_{rad} = 4\pi s^2 \cdot \pi \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_{abs}(\lambda, s, m) B(\lambda, T) d\lambda, \quad E_{abs} = \pi s^2 \Omega \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_{abs}(\lambda, s, m) F_S(\lambda) d\lambda,$$

$\Omega = 2\pi(1 - \sqrt{1 - r_s^2 / r^2})$  - телесный угол Солнца из точки наблюдения,  $T$  - температура нагрева частицы. После некоторых преобразований получим:

$$E_{subl} = \frac{4\pi s^2 \cdot ds/dt \cdot \delta}{\mu m_H} H_L = 4\pi s^2 \frac{H_L}{m_H} C_1 P \frac{1}{\sqrt{\mu T}},$$

где  $C_1$  и  $P$  определены выше.

Сокращая  $\pi s^2$  в выражениях для  $E_{rad}$  и  $E_{abs}$ , получим из (2) рабочую формулу для уравнения теплового баланса:

$$2 \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{r_s^2}{r^2}} \right) \cdot \pi \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_{abs}(\lambda, s, m) F_S(\lambda) d\lambda = 4\pi \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_{abs}(\lambda, s, m) B(\lambda, T) d\lambda + \frac{4C_1}{m_H} \frac{H_L P}{\sqrt{\mu T}}, \quad (3)$$

которая отличается от приведенной в [18] наличием 2-го слагаемого в правой части уравнения. Расчеты температуры показали, что учет этого фактора становится несущественным для расстояний, превышающих  $10r_{sun}$ .

Введем следующие обозначения:

$$Q_a(s, m) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_{abs}(\lambda, s, m) F_S(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_S(\lambda) d\lambda}; \quad Q_r(s, m, T) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_{abs}(\lambda, s, m) B(\lambda, T) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B(\lambda, T) d\lambda} \quad (4)$$

где  $Q_a(s, m)$  - средний эффективный фактор поглощения,  $Q_r(s, m, T)$  - средний эффективный фактор излучения. Последний зависит не только от  $s$  и  $m$ , но и от температуры нагрева  $T$ , а в конечном счете - от расстояния до Солнца  $r$ . Для абсолютно черного тела эти факторы постоянны и равны 1.

Полагая пределы интегрирования равными  $(0, \infty)$ , преобразуем знаменатели в вышеприведенных формулах:

$$4\pi s^2 \cdot \pi \int_0^{\infty} F_S(\lambda) d\lambda = L_S = \text{полное излучение Солнца в ваттах, } L_S = 3.850 \cdot 10^{26} \text{ дж/сек.}$$

$$\pi \int_0^{\infty} B(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \quad (\text{по закону Стефана-Больцмана, } \sigma = 5.67032 \cdot 10^{-8} \text{ дж/(сек} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{K}^4)).$$

$$\text{При больших расстояниях } r: 1 - \sqrt{1 - \frac{r_s^2}{r^2}} = \frac{r_s^2}{2r^2}. \text{ Тогда уравнение теплового баланса (3)}$$

можно записать в более упрощенном виде:

$$\frac{L_S}{16\pi r^2} \cdot Q_a = \sigma T^4 \cdot Q_r + \frac{C_1}{m_H} \frac{H_L P}{\sqrt{\mu T}} = \sigma T^4 \cdot Q_r + Z(T) \cdot H_L, \quad (5)$$

$$\text{где } Z(T) = \frac{C_1 P}{m_H \sqrt{\mu T}} = \frac{133 P}{\sqrt{12 k T \mu m_H}} \text{ - количество молекул, испарившихся за 1 секунду с } 1 \text{ м}^2$$

поверхности. Полученное уравнение использовано для определения температуры частицы на данном расстоянии от Солнца.

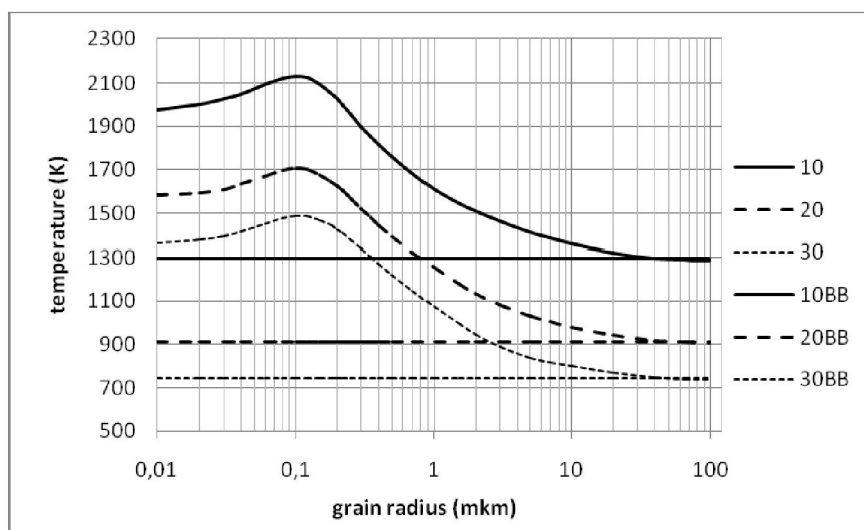


Рисунок 1 – Температуры частиц синтетического оливина на расстоянии 10, 20 и 30 солнечных радиусов. Горизонтальные линии – соответствующие чернотельные температуры (10BB, 20BB и 30BB) для тех же расстояний

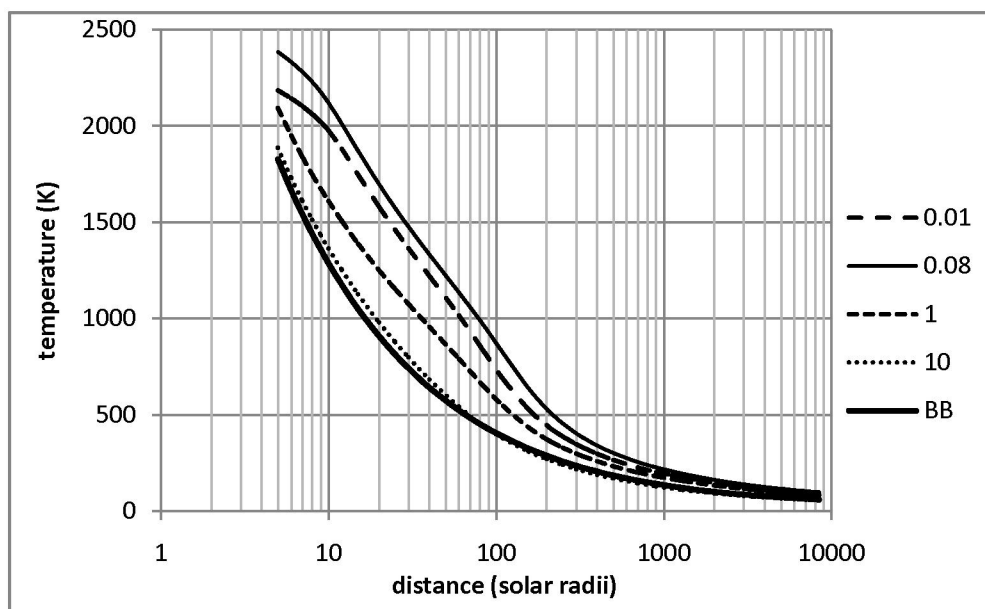


Рисунок 2 – Температура частиц радиусами 0.01, 0.08, 1 и 10 мкм в зависимости от расстояния до Солнца. Жирная линия – абсолютно черное тело (BB)

**Расчеты светового давления.** Расчет среднего фактора радиационного давления  $Q_{pr} = \langle Q_{pre} \rangle$  и отношения силы давления к силе тяготения  $\beta = F_{pre}/F_{grav}$  проведен для частиц синтетического оливина в зависимости от их радиуса  $s$ . Эти параметры не зависят от расстояния до Солнца.

Расчетные формулы имеют вид:

$$Q_{pr}(s, m) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_{pre}(\lambda, s, m) \cdot F(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) \cdot d\lambda}, \quad \beta(s, m) = \frac{F_{pre}}{F_{grav}} = \frac{3 \cdot Q_{pr}(s, m) \cdot L_{sun}}{16\pi \cdot c \cdot \mu_{sun} \cdot \delta \cdot s^2}, \quad (6)$$

где  $Q_{pre}(\lambda, s, m)$  - эффективный спектральный фактор давления, рассчитанный по теории Ми,  $m = n + ik$  - комплексный индекс рефракции для данного вещества,  $F(\lambda)$  - излучение Солнца в

зависимости от длины волны в единицах  $\text{дж}/(\text{сек}\cdot\text{м}^2\cdot\text{мкм}\cdot\text{ср})$ ,  $L_{sun}$  - полная светимость Солнца,  $\mu_{sun} = \mu = GM = 1.32712 \cdot 10^{20} \text{ м}^3/\text{с}^2$  - гравитационный параметр Солнца, равный произведению гравитационной постоянной  $G$  на массу  $M$ ),  $c$  - скорость света.

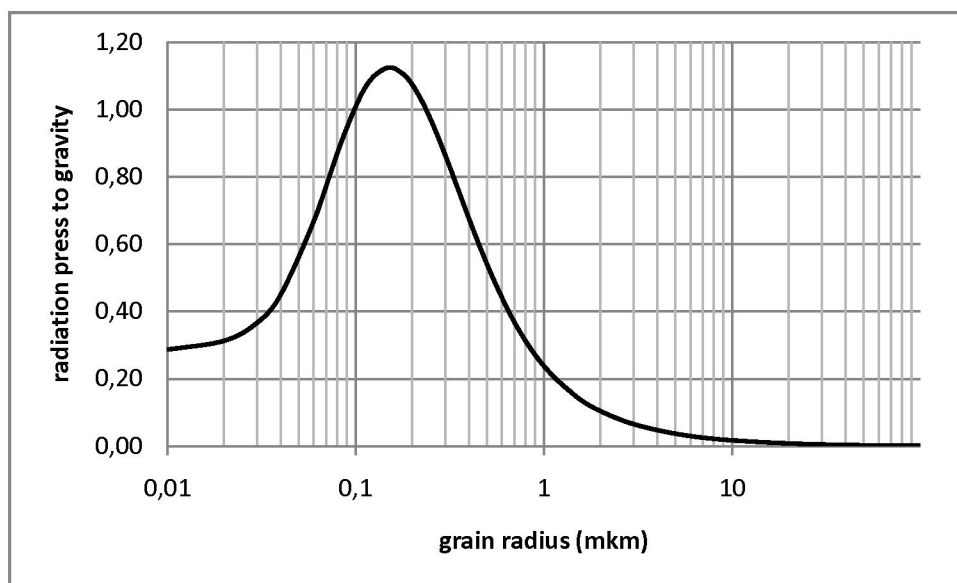


Рисунок 3 – Отношение давления солнечной радиации к силе тяготения  $\beta$  для частиц синтетического оливина

**Алгоритм расчета орбитальной эволюции.** Расчет орбитальной эволюции пылевых частиц основан на численном интегрировании системы дифференциальных уравнений:

$$\ddot{r} = r\dot{\varphi}^2 - \frac{\mu}{r^2} \cdot \left( 1 - \beta - \beta' \cdot \frac{V_{wr} - \dot{r}}{U} \right) \quad (7)$$

$$\ddot{\varphi} = -\frac{1}{r^2} \cdot \left[ 2r \cdot \dot{r}\dot{\varphi} + \alpha \cdot \dot{\varphi} \cdot \left( 1 + \frac{r_{sun}^2}{2r^2} \right) + \alpha' \cdot \left( \dot{\varphi} - \frac{V_{w\tau}}{r} \right) \right] \quad (8)$$

$$\dot{s} = \frac{0.0408}{\delta} \cdot P \cdot \sqrt{\frac{M_g}{T}} \quad (9)$$

Для вычисления давления насыщенных паров  $P$  служит формула [4,5]:

$\lg(P) = 10.915 - 24928.3/T$ , где  $P$  выражено в торах (1тор = 1мм.рт.ст.). В уравнении (9)

давление  $P$  выражено в торах, а плотность  $\delta$  выражено в  $\text{г}/\text{см}^3$ ,  $\dot{s}$  в  $\text{см}/\text{сек}$ . Приняты следующие обозначения:  $\dot{r} = dr/dt$  - скорость изменения  $r$  со временем;  $\ddot{r} = d^2r/dt^2$  - ускорение;  $\varphi$  - полярный угол (угол поворота вектора  $\vec{r}$ );  $\dot{\varphi} = d\varphi/dt$  - угловая скорость изменения  $\varphi$  со временем;  $\ddot{\varphi} = d^2\varphi/dt^2$  - угловое ускорение;  $\dot{M}$  - потеря массы Солнца;  $\dot{s} = ds/dt$  - скорость изменения радиуса частицы  $s$  со временем;  $M_g$  - молекулярный вес материала частицы;  $\alpha = \beta \cdot \mu/c$ ;  $\alpha' = \beta' \cdot \mu/U = 3\dot{M}/(16\pi \cdot s \cdot \delta) \cdot U/V_{wr}$ ;  $V_{wr}$  - радиальная и  $V_{w\tau}$  - тангенциальная составляющая скорости солнечного ветра;  $U = \sqrt{V_{wr}^2 + V_{w\tau}^2}$  - модуль скорости звездного ветра;

$\beta' = \frac{3\dot{M} \cdot U^2}{16\pi \cdot \mu \cdot s \cdot \delta \cdot V_{wr}}$  - аналог  $\beta$ , отношение силы давления солнечного ветра к силе гравитации.

Совокупность 3-х уравнений эквивалентна системе из пяти дифференциальных уравнений 1-го порядка относительно искомых функций времени:  $r, \dot{r}, \varphi, \dot{\varphi}, s$ . Для решения этой системы применяется метод Рунге-Кутты 4-го порядка точности с постоянным шагом.

**Результаты расчетов орбитальной эволюции.** Орбитальная эволюция частиц рассчитана для ряда начальных радиусов частиц  $s_0$  от 0.01 мкм до 100 мкм и различных стартовых расстояний  $r_0$  вблизи зоны сублимации. Предполагается, что частица срывается с родительского тела, движущегося по круговой орбите. Расчет проводился с использованием реального распределения энергии в солнечном спектре согласно [13].

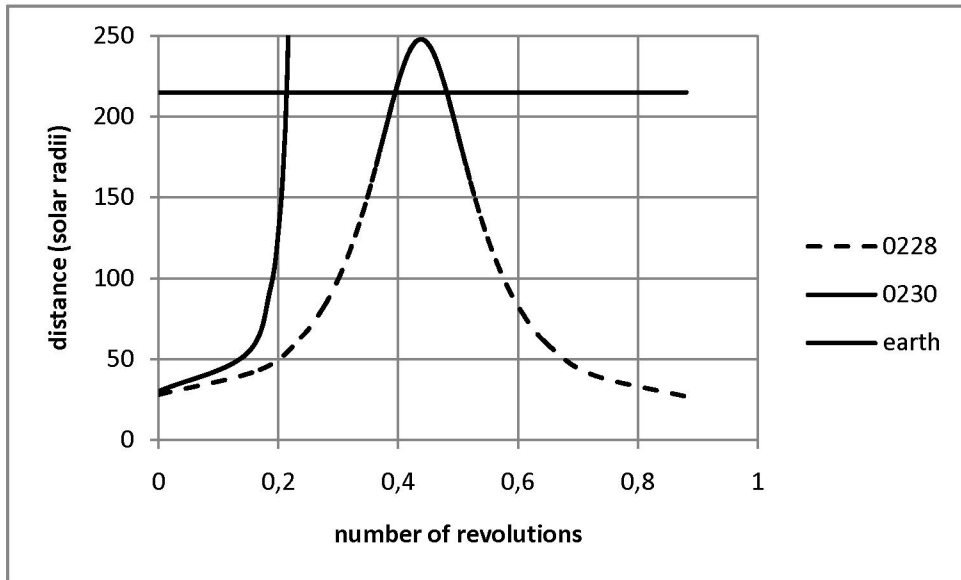


Рисунок 4 – Орбитальная эволюция частицы синтетического оливина с начальным радиусом  $s_0 = 0.2$  мкм. Стартовые расстояния  $28r_{\text{sun}}$  и  $30r_{\text{sun}}$ . Горизонтальная линия – расстояние земной орбиты

Как видно из рисунка 4 орбитальная эволюция частицы с начальным радиусом  $s_0 = 0.2$  мкм зависит от стартового расстояния вблизи зоны сублимации. Частица, стартующая с расстояния  $28r_{\text{sun}}$ , испаряется, не сделав и одного орбитального оборота. При этом она успевает вылететь на высокоэллиптическую орбиту за пределы орбиты Земли. Такая же частица, стартующая с расстояния  $30r_{\text{sun}}$ , улетает, покидая Солнечную систему.

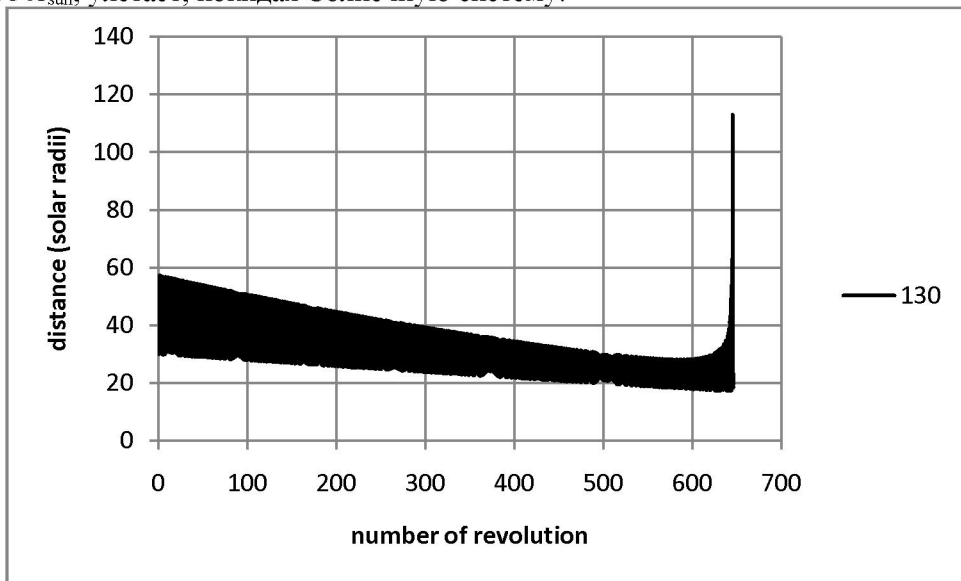


Рисунок 5 – Орбитальная эволюция частицы синтетического оливина с начальным радиусом  $s_0 = 1$  мкм. Стартовое расстояние  $30r_{\text{sun}}$ , финальное -  $18r_{\text{sun}}$

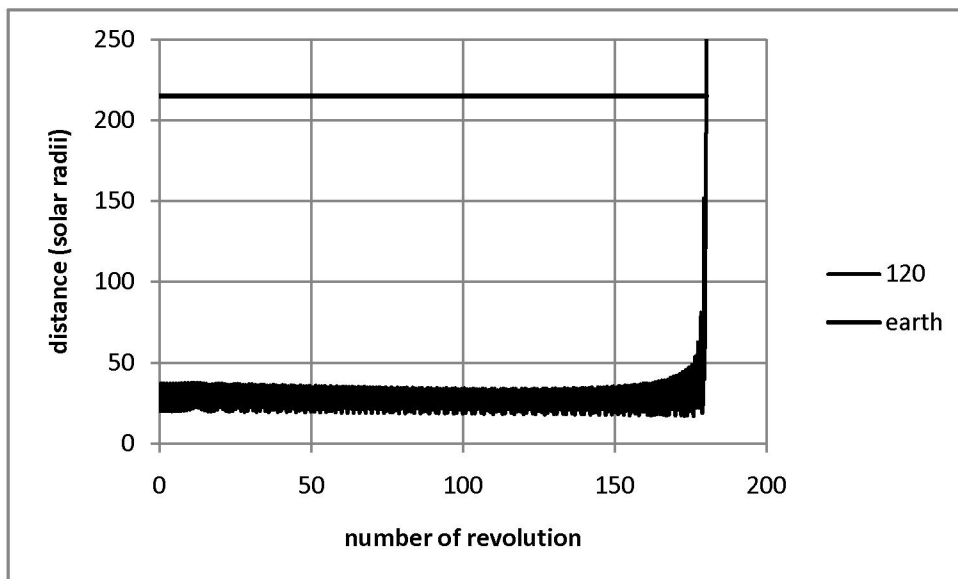


Рисунок 6 – Орбитальная эволюция частицы синтетического оливина с начальным радиусом  $s_0 = 1$  мкм. Стартовое расстояние  $20r_{\text{sun}}$

Из рисунка 5 видно, что частица радиусом 1 мкм, стартующая с расстояния  $30r_{\text{sun}}$ , успевает сделать более 600 оборотов и после вылета на высокоэллиптическую орбиту до расстояний, близких к  $120r_{\text{sun}}$ , возвращается в перигелий (около  $18r_{\text{sun}}$ ), где полностью испаряется. Такая же частица, стартующая с круговой орбиты внутри зоны сублимации на расстоянии  $20r_{\text{sun}}$  (рис.6), выбрасывается за пределы орбиты Земли ( $215r_{\text{sun}}$ ).

**Обсуждение результатов и выводы.** После выполнения расчетов орбитальной эволюции частиц с различными начальными радиусами и различными расстояниями от Солнца, получено, что область активной сублимации начинается на расстоянии 30 солнечных радиусов. Согласно нашим расчетам, после отрыва от родительского тела, движущегося по круговой орбите, частицы радиусами в интервале от 0.04 до 0.6 мкм покидают Солнечную систему под действием светового давления, если в момент отрыва не окажутся в зоне сублимации. Частицы меньших размеров сближаются с Солнцем и испаряются. Частицы больших размеров постепенно дрейфуют в зону сублимации, где сначала выходят на высокоэллиптические орбиты, затем полностью испаряются. Неожиданным оказалось поведение крупных частиц, оторвавшихся от родительских тел внутри зоны сублимации, после выхода на высокоэллиптические орбиты они могут покинуть Солнечную систему, испарившись до характерного радиуса 0.4 мкм.

Сравнение с наблюдениями [9] показывает, что нижний предел распределения частиц по размерам совпадает с расчетной величиной  $s = 0.6$  мкм. Частицы синтетического оливина, размеры которых меньше этого предела не могут существовать в Солнечной системе, они изгоняются световым давлением. В то же время, радиус зоны сублимации  $18r_{\text{sun}} - 30r_{\text{sun}}$  получается слишком завышенным по сравнению с данными наблюдений, согласно которым он не превышает  $7-11r_{\text{sun}}$ .

Работа выполнена по проекту грантового финансирования № 0069/ГФ4 Комитета науки МОН РК.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Reach W. T., Franz B. A., Weiland J. L. The Three-Dimensional Structure of the Zodiacal Dust Bands // *Icarus* 1997. V.127. P.461-484.
- [2] Kelsall T. et al. The COBE Diffuse Infrared Background Experiment Search for the Cosmic Infrared Background: II. Model of the Interplanetary Dust Cloud // *Astrophys. J.* 1998. V.508. P.44-73.
- [3] Roser S. and Staude H.J. The Zodiacal light from 1500 Å to 60 micron // *Astron. Astrophys.* 1978. V.67. P. 381-394.
- [4] Lamy P.L. The Dynamics of Circum-solar Dust Grains // *Astron. Astrophys.* 1974a. V.33. P. 191-194.
- [5] Lamy P.L. Interaction of interplanetary dust grains with the solar radiation field // *Astron. Astrophys.* 1974b. V.35. P. 197-207.
- [6] Mikai T., Yamamoto T., Hasegawa A., Fujiwara A., and Koike C. On the circumsolar grain materials // *Publications of the Astronomical Society of Japan* 1974. V.26 P. 445-458.
- [7] Mikai T. and Yamamoto T. A Model of the Circumsolar Dust Cloud // *Publications of the Astronomical Society of Japan* 1979. V.31. P.585-596.



- [8] Lamy P.L., Perrin J.-M. Circumstellar grains: radiation pressure and temperature distribution // *Astron. Astrophys.* 1997. V.327. P.1147-1154.
- [9] Shestakova L.I., Demchenko B.I. Results of Observations of the dust distribution in the F-corona of the Sun // *Solar System Research.* 2015. V.50. P.143 – 160.
- [10] Dorschner J., Begemann B., Henning Th., Jäger C., Mutschke H. Steps toward interstellar silicate mineralogy II. Study of Mg-Fe-silicate glasses of variable composition // *Astron. Astrophys.* 1995. V.300. P.503-520.
- [11] Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами // М., МИР, 1986. 664с.
- [12] Masafumi M., Munezo S. Polarization Efficiency and Phase Function, Calculated on the Basis of the Mie Theory // *The Science Reports of the Tohoku University, Eighth Series.* 1985. V.6. №.1. P.11-48.
- [13] Макарова Е.А., Харитонов А.В., Казачевская Т.В. Поток солнечного излучения. М., “Наука”, 1991. 401 с.
- [14] Lamy P.L. Optical properties of silicates in the far ultraviolet // *Icarus* 1978. V.34. P.68-75.
- [15] Pollack J.B., Toon O.B. and Khare B.N. Optical properties of some terrestrial rocks and glasses // *Icarus* 1973. V.19. P.372-389.
- [16] Веселовский И.С. Солнечный ветер и гелиосферное магнитное поле. Модель космоса. Научно-информ. издание // Ред. Панасюк М.И., Новикова Л.С. Т. 1. Физические условия в космическом пространстве. М.: КДУ, 2007. С. 314–359.
- [17] Kobayashi H., Kimura H., Watanabe S., Yamamoto T., Müller S. Sublimation temperature of circumstellar dust particles and its importance for dust ring formation // *Earth, Planets, Space.* 2011. V.20. P.1-9.
- [18] Шестакова Л.И., Демченко Б.И. Орбитальная эволюция пылевых частиц в области сублимации около звезды солнечного типа // *Известия НАН РК. Серия физико-математическая.* 2013. № 5. С.77-87.

#### REFERENCES

- [1] Reach W. T., Franz B. A., Weiland J. L. *Icarus*, 1997, 127, 461-484.
- [2] Kelsall T. et al. *Astrophys. J.*, 1998, 508, 44-73.
- [3] Roser, S. and Staude, H.J. *Astron. Astrophys.*, 1978, 67, 381-394.
- [4] Lamy, P.L. *Astron. Astrophys.*, 1974a, 33, 191-194.
- [5] Lamy, P.L. *Astron. Astrophys.*, 1974b, 35, 197-207.
- [6] Mikai, T., Yamamoto, T., Hasegawa, A., Fujiwara, A., and Koike, C. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 1974, 26, 445-458.
- [7] Mikai, T. and Yamamoto, T. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 1979, 31, 585-596.
- [8] Lamy, P.L., Perrin, J.-M. *Astron. Astrophys.*, 1997, 327, 1147-1154.
- [9] Shestakova L.I., Demchenko B.I. *Solar System Research*, 2016, 50, №2, 143-160.
- [10] Dorschner J., Begemann B., Henning Th., Jäger C., Mutschke H. *Astron. Astrophys.* 1995. V.300. P.503-520.
- [11] Boren C.F., Hafmen D.R. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, 1983, John Wiley & Sons, Inc., 664.
- [12] Matsumura M., Seki M. *Polarization Efficiency and Phase Function Calculated on the Basis of the Mie Theory.* Faculty of Science, Tohoku University, SENDAI, JAPAN. Eighth Series, 1985, 6, 11-48.
- [13] Makarova E.A., Kharitonov A.V. Kazachevskaja T.V. *Potok solnechnogo izlucheniya.* 1991, Moscow, Nauka, 401 (in Russ.).
- [14] Lamy P.L. *Icarus*, 1978, 34, 68-75.
- [15] Pollack J.B., Toon O.B. and Khare B.N. *Icarus*, 1973, 19, 372-389.
- [16] Veselovskij I.S. Eds. Panasyuk M.I., Novikova L.S. *Fizicheskie usloviya v kosmicheskom prostranstve.* Moscow: KDU, 2007, 1, 314–359 (in Russ.).
- [17] Kobayashi H., Kimura H., Watanabe S., Yamamoto T., Müller S. *Earth, Planets, Space.* 2011. V.20. P.1-9.
- [18] Shestakova L.I., Demchenko B.I. *Izvestiya NAN RK. Seriya fiz.-mat.* 2013. № 5. P.77-87. (In Russian).

Б.И. Демченко, Л.И. Шестакова

В.Г. Фесенков атындағы Астрофизика институты, Алматы, Қазақстан

#### КҮН МАҢЫНДА СУБЛИМАЦИЯ ПРОЦЕСІНДЕ ОЛИВИН ТОЗАҢ БӨЛШЕКТЕРІНІҢ ОРБИТАЛЫҚ ДАМУЫ

**Аннотация.** Булану процесінде оливина ( $MgFeSiO_4$ ) синтетикалық бөлшектері үшін күн маңындағы аймақта тозаң бөлшектерінің орбиталық эволюциясының үлгілендіру нәтижелері ұсынылды. Тозаң бөлшектері температураларының есептері 0.1 ден 10 мкм дейін радиустер жиынтығы және Күннен әртүрлі қашықтықтар үшін орындалды. Есептер булануда жоғалту есебінен «жұту-сәулелену» жылу балансы теңдеулерінің шешіміне негізделген. Синтетикалық оливин рефракциясының индекстерімен сәйкес біртекті сфералық бөлшектер үшін Ми теориясы бойынша оптикалық қасиеттері есептелді.

Біз тозаң бөлшектері динамикасына радиация қысымының, күн желінің және Пойнтинг-Робертсон тежегіштігі тиімділігі әсерін қарастырдық. Белсенді сублимация аймағы 30 күн радиустері құшықтығында басталатыны белгіленді. Біздің есептерге сәйкес, егер аталық денеден ажырау сәтінде олар сублимация аймағында болатын болса, аталық денеден ажырағаннан кейін жарық қысымы әсерінен 0.04 ден 0.6 мкм дейін интервалда бөлшектер радиустармен Күн жүйесінен кетеді. Айтарлықтай ұсақ бөлшектер Күнге жақындайды және буланып кетеді. Айтарлықтай ірі бөлшектер олар жоғары эллиптикалық орбиталарға кіретін және сосын толығымен буланып кететін сублимация аймағына ауытқиды.

Сублимация аймағы ішінде аталық денеден бөлінген ірі бөлшектер жүрісі күтпеген жағдай болып табылды. Олар жоғары эллиптикалық орбиталарға кіргеннен кейін 0.4 мкм сипатты радиусқа дейін буланып Күн жүйесінен кетуі мүмкін.

**Түйін сөздер:** күн жүйесі, күн маңындағы тозаң, орбиталық даму, тозаң сублимациясы.